

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Füüsika instituut

Mari-Liis Aru

**KOLLASE HÜPERHIIU HR 8752 EMISSIOONIJOONE
[N II] 6583 Å MUUTLIKKUSE UURIMINE**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendajad:
Indrek Kolka, PhD
Andreas Valdmann, MSc

Tartu 2017

Kollase hüperhiu HR 8752 emissioonijoone

[N II] 6583 Å muutlikkuse uurimine

HR 8752 on kollase hüperhiu tüüpi täht, mille puhul on 30 aasta jooksul vaadeldud märkimisväärsed muutusi. Tema spektris esineb prominentne ioniseeritud lämmastiku keelatud emissioonijoon lainepikkusel 6583 Å, mille ekvivalentlaidus on aastatel 1961–1976 kahanenud ja 1976–1992 lineaarselt kasvanud. Käesoleva bakalaureusetöö käigus töödeldakse tähe spektrid aastatest 2000–2017, et analüüsida ekvivalentlaiduse ja seekaudu tähe edasist käitumist. Andmetöötlus hõlmab standardprotseduuri programmis IRAF ja iga spektri normaliseerimist pidevspektri tasemele ehk kontinumile. Tulemuste kohaselt jätkub ekvivalentlaiduse suurenemine, kuid osutub, et see ei olnud peale 1992. aastat lineaarne. Ajavahemikus 1992–2000 kasvas ekvivalentlaidus varasemast kiiremini, mis viitab intensiivsemale tähe heleduse kahanemisele punases piirkonnas ja intensiivsemale tähe efektiivse temperatuuri kasvule. Aastail 2000–2017 seevastu ekvivalentlaiduse suurenemine aeglustus ja seega aeglustusid ka heleduse ja temperatuuri muutused.

Märksõnad: tähed, muutlikkus, emissioonijoon, ülihiid, meetod: spektroskoopia

CERCS: P520 - Astronoomia, kosmoseuuringud, kosmosekeemia

Behavioral Study of the Yellow Hypergiant HR 8752

[N II] Emission Line at 6583 Å

HR 8752 is a yellow hypergiant, which went through significant changes in 30 years. There is a prominent forbidden nitrogen emission line in its spectrum at 6583 Å, whose equivalent width decreased in 1961–1976 and increased linearly in 1976–1992. For the given study, the spectral data of HR 8752 from 2000–2017 is reduced in order to analyze the equivalent width and in turn, the star's behavior. Data reduction comprises a standard process with the software IRAF and continuum-normalizing each spectrum. According to the results, the equivalent width continues to increase, but not linearly. In 1992–2000, the equivalent width grew much faster than before, which indicates the decrease of the star's red-band brightness and the rise of the star's effective temperature to be more rapid. By contrast, in 2000–2017, the growth of the equivalent width became slower, and therefore the changes in brightness and temperature also became slower.

Keywords: stars, variability, emission-line, supergiants, techniques: spectroscopic

CERCS: P520 - Astronomy, space research, cosmic chemistry

Sisukord

Sissejuhatus	5
1 Hüperhiid	6
1.1 Definiitsioon	6
1.2 Hüperhiidude areng peale peajada faasi	7
1.3 Kollased hüperhiid	8
2 Kollane hüperhiid HR 8752 ja tema spekter	10
2.1 HR 8752 spekter ja [N II] emissioon	10
2.2 Massikaotuse episoodid	11
2.3 [N II] 6583 Å spektrijoone vaadeldavad suurused	12
2.3.1 Radiaalkiirus	12
2.3.2 Ekvivalentlaidus ja profiil	12
3 Vaatlused	15
4 Andmetöötlus	17
4.1 Aastate 2014–2017 andmed	17
4.2 Aastate 2000–2013 andmed	21
5 Tulemused	23
5.1 [N II] 6583 Å spektrijoone ekvivalentlaidused 2000–2017	23
5.1.1 Ekvivalentlaiduste mõõtemääramatuste hindamine	24
5.1.2 Tulemuste hajumine	27
5.2 Tulemuste võrdlus varasema epohhiga	29
6 Kokkuvõte	32
Tänuavaldused	33
Kirjandus	34

Sissejuhatus

Kollast värvi ehk temperatuurivahemikku 4000–8000 K kuuluvad hüperhiid on massiivsed tähed, mida on Linnutees teada kõigest 15. Nende tormilise evolutsiooni puhul on vaadeldud faasi, mida nimetatakse tühikuks kollaste hüperhiidude arengudiagrammil ehk lühidalt kollaseks tühikuks (ingl *Yellow Evolutionary Void*), sest seal ei leidu praktiliselt üldse tähti (de Jager ja Nieuwenhuijzen, 1997). Üks kollastest hüperhiidudest on HR 8752, mis on oma ainet suures koguses episoodiliselt välja paisanud. Ta jõudis 30 aasta jooksul kaks korda kollase tühiku ääreni ning tema efektiivne temperatuur muutus seejuures kõrgemast madalamaks ja vastupidi. Kõige hiljutisema artikli kohaselt, milles osales ka käesoleva bakalaureusetöö juhendaja, on efektiivne temperatuur kõrgem kui kunagi varem – 8000 K (Nieuwenhuijzen et al., 2012). See tähendab, et HR 8752 on kollast tühikut läbimas.

Eelmainitud muutusi saab uurida HR 8752 spektri kaudu, kus esineb prominentne ioniseeritud lämmastiku keelatud emissioonijoon lainepikkusel 6583 Å. Viimase ekvivalentlaiust on aastate 1961–1976 jaoks hinnatud ja 1976–1992 mõõdetud ning see on samuti varieerunud (Sheffer ja Lambert, 1992). Ekvivalentlause edasine mõõtmine võimaldab kollast hüperhiidu jälgida tema evolutsiooni otsustavas faasis. Kollaste hüperhiidude arengu mõistmine lubab omakorda täpsustada nende eluteed supernoovana plahvatamiseni ja seega ennustada elu tekkeks vajalike raskete elementide paiskumist universumisse.

Käesoleva uurimistöö esimeseks eesmärgiks on töödelda ja normaliseerida kõik Tartu Observatooriumi 1,5-meetrise teleskoobiga kogutud tähe HR 8752 vaatlusandmed ning mõõta töödeldud spektritelt 6583 Å joone ekvivalentlaiused. Spektreid on aastatest 2000–2017 kokku üle viiekümne. Teiseks, hinnata saadud tulemuste mõõtemääramatusi. Kolmandaks, analüüsida tulemusi ja teha esmased järeldused tähe muutlikkuse kohta. Viimase eesmärgi raames võrreldakse ekvivalentlause käitumist epohhiga 1976–1992, kui see kasvas peaaegu lineaarselt. Hüpooteesiks on lineaarse kasvu jätkumine.

Kõigepealt antakse ülevaade hüperhiidudest, tähest HR 8752 ja tema spektrist ning selle eelnevast uurimisest. Seejärel kirjeldatakse andmetöötluse etappe ja meetodeid. Viimasena esitletakse ja analüüsitakse tulemusi.

Peatükk 1

Hüperhiid

1.1 Definiitsioon

Hüperhiid kuuluvad kõige massiivsemate ja heledamate tähtede hulka, millel on väga turbulentne fotosfäär ja intensiivse massikaotuse tagajärjena tekkinud ümbris.

Neid tähistatakse Morgani–Keenani (MK) süsteemi järgi heledusklassiga 0 või Ia+. Rooma number I tähistab ülihiide ja “a” tähistab selle klassi kõige suuremat heledust, “b” käib vähem heledate ülihiidude kohta. Plussi hakati kasutama rõhutamaks, et hüperhiid ei esinda erinevat heledusklassi, vaid pigem erilist tüüpi Ia-klassi ülihiide. Mõned Ia-tüüpi tähed võivad olla heledamad kui Ia+ tähed.

Feast ja Thackeray (1956) kasutasid mõistet “üli-ülihiid” tähtede jaoks, mille absoluutne heledus oli suurem kui -7 tähesuurst. Absoluutne tähesuurus on defineeritud kui tähe näiv heledus 10 parseki kaugusel asuva vaatlaja jaoks. Hiljem tegi Keenan (1971) ettepaneku kasutada terminit ainult ülihiidude jaoks, mille spektri vesiniku Balmeri seeria esimese joone ($H\alpha$)¹ piirkonnas esineb vähemalt üks lai emissioonijoon. See viitab tähe ulatuslikule atmosfäärile või suhteliselt intensiivsele massikaotusele. Ulatusliku atmosfääri paksus on võrreldav tähe raadiusega ning seda ei saa käsitleda tasaparalleelse kihina nagu Päikesesarnaste tähtede õhukeste atmosfäärade puhul (Schmid-Burgk ja Scholz, 1975).

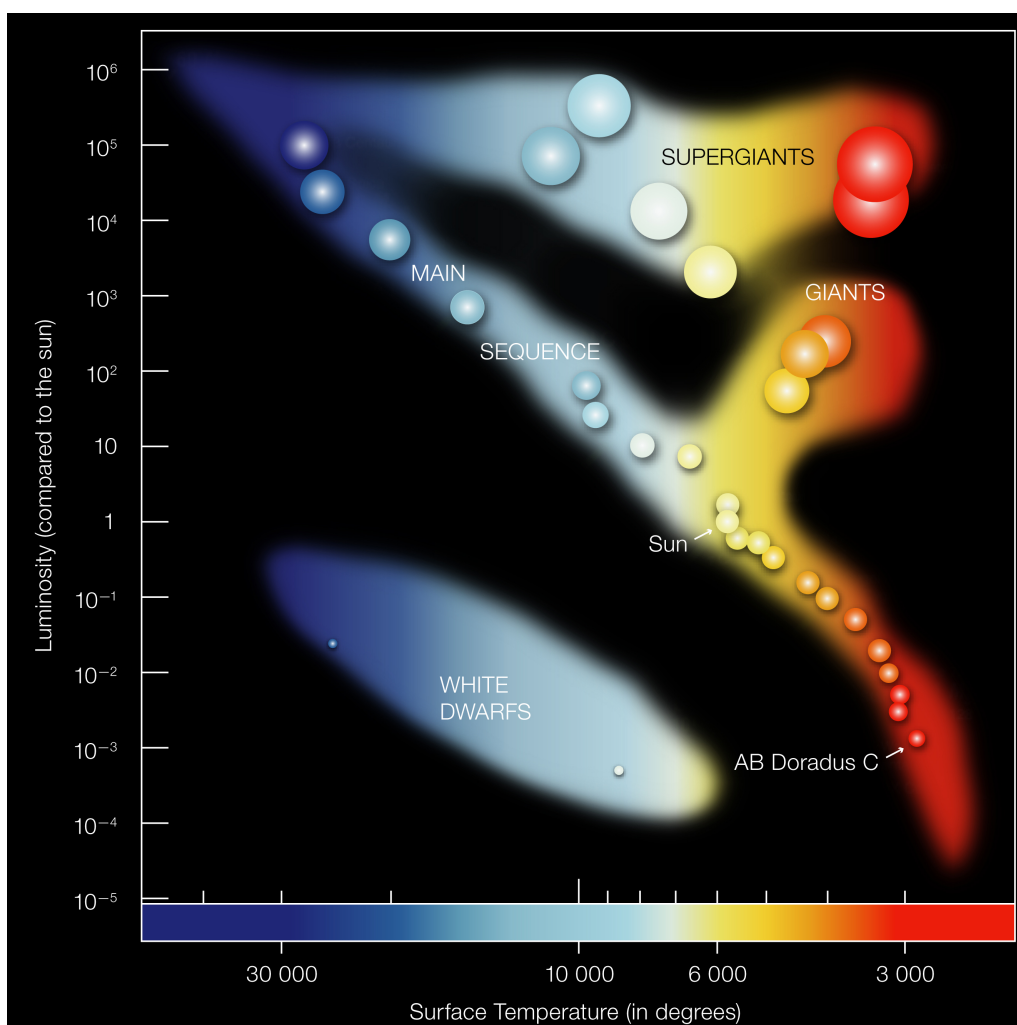
Tänapäeval kasutataksegi hüperhiidude jaoks kõige laialdasemalt Keenani kriteeriumit. Lisaks eristavad neid tähti teiste sarnase temperatuuri ja heledusega Ia tähtedest märkimisväärselt laiemad neeldumisjooned.

¹ $H\alpha$ on spektrijoon lainepikkusega 6562,8 Å, mis tekib kui vesiniku elektron langeb oma kolmandalt madalaimalt energiatasemelt teisele ja kiirgab footoni.

Hüperhiidud esinevad samas või sarnases Hertzsprungi-Russelli (HR) diagrammi piirkonnas koos teiste erinevatest klassidest tähtedega. Tekib küsimus, miks osal sarnase heleduse ja spektritüübiga tähtedest on sellised tunnused ja teistel mitte. See ongi keskne hüperhiidude uurimisprobleem (de Jager, 1998).

1.2 Hüperhiidude areng peale peajada faasi

Tähtede jaotuse visualiseerimiseks nende spektriklassi või efektiivse temperatuuri ja absoluutse tähesuuruse või heleduse järgi kasutatakse HR-diagrammi. Morgani-Keenani süsteemi kohaselt on tähtede spektriklassid O, B, A, F, G, K, ja M, kus O-tüüp on kuumim ja M jahedaim. Iga klassi täpsustatakse talle järgneva numbriga, kus 0 on kuumim ja 9 jahedaim.



Joonis 1.1: HR-diagramm, kus tuuakse välja tähed vastavalt nende pinnatemperatuurile ja Päikesega võrreldavale heledusele. Graafikul on märgitud valged kääbused (ingl *white dwarfs*), peajada (ingl *main sequence*), hiidude jada (ingl *giants*) ja ülihiid (ingl *supergiants*). (ESO, 2007)

Enamik tähti asuvad HR-diagrammi ribal, mida nimetatakse peajadaks. Nende tähtede tuumades toimub vesiniku süntees heeliumiks (vt joonis 1.1).

Tähed algmassiga $20\text{--}30 M_{\odot}$ (Päikese massi) arenevad pärast peajadalt lahkumist sinisteks ülihiidudeks. Seejärel nad jahtuvad ja paisuvad punasteks ülihiidudeks. Kui tähtede välimised kihid paisatakse laiali, läbivad nad tagasipööride sinise ülihiu faasi suunas (ingl *blue loop*) ehk nad tõmbuvad kokku ning kuumenevad. Kui kuumenemise vältel tõuseb efektiivne fotosfääriline temperatuur väärtuseni 7000 K , muutub fotosfääri põhiosa ebastabiilseks, mistõttu nimetatakse seda HR-diagrammil ebastabiilsuse piirkonnaks. Selles piirkonnas võib toimuda mitmeid lühiajalisi suuri massikaotusi, mis on iseloomulikud hüperhiidudele (de Jager ja Nieuwenhuijzen, 1997).

Tähed, mille algmass on suurem kui $40 M_{\odot}$ ei jahtu kunagi piisavalt, et sinisest ülihiuist punaseks saada ning arenevad üliheledaks siniseks muutlikuks täheks ehk LBV-täheks (ingl *luminous blue variable*). Nad kaotavad juba peajadal olles neilt lähtuva väga intensiivse laetud osakeste voo ehk tähetuule tõttu suure osa oma massist (Meynet et al., 2011).

Tähed HR-diagrammi ülemises osas, kus hüperhiid asuvad, võivad olla seega hiljuti peajadast arenenud või palju kauem arenenud punase ülihiu faasi järgsed tähed. Nende eluiga on suurest massist tingituna kosmilises ajaskaalas väga lühike – vaid mõni miljon aastat võrreldes Päikese-sarnaste tähtede elueaga umbes 10 miljardit aastat (Goldsmith ja Owen, 2001).

1.3 Kollased hüperhiid

Kollased hüperhiid on endised punased ülihiid, mis arenevad HR-diagrammi sinisemale ehk kuumemale poole (de Jager, 1998). Tähtede füüsikaline seisund on punasest ülihiu faasist lahkudes teistsugune kui selleni arenemisel, sest nad kaotavad punase ülihiuuna väga palju ainet. Kollased hüperhiid on visuaalselt ühed heledaimad tähed absoluutse heledusega umbes -8 (Nieuwenhuijzen et al., 2012).

Kollaste hüperhiidude puhul on täheldatud omapärast faasi, mida nimetatakse tühikuks kollaste hüperhiidude arengudiagrammil. Hilisema uuringu järgi koosneb kollane tühik kahest erinevast ebastabiilsuse piirkonnast. Esimeses piirkonnas on hüperhiidude efektiivsete temperatuuride logaritmid $3,8 < \log T_{eff} < 3,95$ ja teises piirkonnas $4,05 < \log T_{eff} < 4,15$ (Nieuwenhuijzen et al., 2012). Mudeli põhjal läbib peajada massiga $25 M_{\odot}$ ja heledusega $\log(L/L_{\odot}) = 5,3$ täht tühiku 10 000 aastaga (Meynet et al., 1994).

Tähed muutuvad tühikule lähenedes äärmiselt ebastabiilseks ja kaotavad tohutul hulgal massi. Ebastabiilsus tekib negatiivse tiheduse gradiendi esinemise tõttu fotosfääris. See võib tekkida

vesiniku konvektsioonialas, kui keskmine efektiivne fotosfääriline kiirendus $g_{eff} < 0$, mis tähendab atmosfääri eraldumist tähe külgetõmbejõust. Negatiivne tiheduse gradient võib tekkida ka konvektsioonialast väljaspool juhul kui g_{eff} on väga väike. Viimane viitab väga kaugele ulatuvale atmosfäärile. Seda kirjeldab tähe aine olekuvõrrand:

$$\frac{d \ln \rho}{dz} = \frac{d \ln \mu}{dz} + \frac{d \ln P}{dz} - \frac{dT}{dz}, \quad (1.1)$$

kus z on geomeetriline sügavus, ρ on massi tihedus, μ on keskmine molekulaarmass, P on rõhk ning T on temperatuur. Ionisatsiooniastme suurenemise tõttu kõrgematel temperatuuridel muutub esimene liige paremal pool võrdusmärgi temperatuuril $7000 \text{ K} < T < 13000 \text{ K}$ negatiivseks. Ka kolmas liige on negatiivne. Keskmine liige on jahedates fotosfäärides hüdrosstaatilise tasakaalu tõttu positiivne, kuid väike:

$$\frac{d \ln P}{dz} = \frac{\mu g_{eff}}{RT}. \quad (1.2)$$

Kuna kollastel üli- ja hüperhiidudel on suur raadius R ja g_{eff} väga väike, võib võrrandi 1.1 parem pool muutuda negatiivseks.

Negatiivsest tiheduse gradiendist tingitud ebastabiilsus võib viia lööklaineteni ja need omakorda atmosfäärist mingi osa eemale paiskamiseni (de Jager, 1998).

Tühiku läbimine eristab kollaseid hüperhiide LBV-tähtedest, kuigi kõige kõrgema temperatuuriga kollased hüperhiid ja kõige jahedamad sinised muutlikud tähed võivad mõlemad olla temperatuuriga umbes 8000 K . Madalama temperatuuri juures ei ole kollased hüperhiid ja punased ülihiid selgelt eristatud – RW Cephei temperatuuriga 4500 K ja heledusega $555\,000 L_{\odot}$ on näide nii punase ülihiidu kui ka kollase hüperhiidu tunnustega tähest (Stothers ja Wen Chin, 2001) (Nieuwenhuijzen ja de Jager, 2000).

Mõned näiliselt kollased ülihiid võivad tegelikult olla kuumemad, jaheda pseudo-fotosfääriga maskeeritud tähed (Stothers ja Wen Chin, 2001). Pseudo-fotosfäär saab tekkida LBV-tähtedel, millest väljavoolav aine on optiliselt piisavalt tihe. Nii jääb mulje suuremast ja jahedamast tähest, kuigi selle all peituv sinine ülihiid pole enamjaolt muutunud (Benaglia et al., 2007).

Peatükk 2

Kollane hüperhiid HR 8752 ja tema spekter

HR 8752 kuulub kuuliikmelisse tähtede gruppi, mille tähtede massid peajada faasis on 20–40 M_{\odot} . Tema raadius on muutunud 400–900 R_{\odot} ja heledus 200 000–400 000 L_{\odot} (Nieuwenhuijzen et al., 2012). HR 8752 on Galaktika üks heledamaid tähti absoluutse heledusega -9 ja seetõttu väga hästi vaadeldav. Lisaks on ta Kassiopeia tähtkujus tähistaeva põhjapooluse lähedal, tänu millele saab teda Tartu Observatooriumis igal aastaajal jälgida.

Huvipakkuva hüperhiid spektriklass oli 20. sajandi alguses G0, siis K 1973. aastal, jälle G0 1977. aastal ning A6 2011. aastal (Nieuwenhuijzen et al., 2012).

2.1 HR 8752 spekter ja [N II] emissioon

Tähtede spektrid sisaldavad neeldumis- ja kiirgusjooni. Esimesed tekivad, kui gaas tähe atmosfääris neelab teatud lainepikkusel footoneid, mistõttu toimub aatomite või ionide üleminek ergastatud olekusse (Emerson, 1999).

Emissioonijoonte tekkemehhanism on erinev. Vesiniku ionisatsioonil vabanevatel vabadel elektronidel on mõne elektronvoldine energia. Need elektronid põrkuvad mitteelastselt raskemate elementide nagu hapniku, lämmastiku ja väävli ionidega, mille ergastatud tasemed on madalad. Kokkupuõrgete tulemusena ergastatakse ionid nendele tasemetele, kust nad footoni kiirgamise järel jälle tagasi algolekusse langevad. Ioonid saavad oma ergastusenergia seega elektronide kineetilisest energiast.

Kui kiirguslik üleminek tähendab elektronide püsimist ergastatud olekus enne footoni

kiirgamist suurusjärgus 10^{-8} sekundit, siis teatud kindlatele madalatele energiatasemetele ergastatud ioonid võivad vastavas olekus püsida mitmeid tunde. Sellist seisundit nimetatakse metastabiilseks ja vastavat üleminekut ning footoni kiirgamisel tekkivat joont keelatuks. Keelatud jooni tähistatakse atomaarse või molekulaarse elemendi liigi ümber nurksulgudega (Basu, 2003).

Keelatud joonte tekkeks vajalik keskkond peab olema kõrgelt ioniseeritud ja ülihõre. Sellised on kosmoses ioniseeritud atomaarse vesiniku H II piirkonnad tihedustega kõigest mõni aatom kuupsentimeetri kohta. Astronoomias tähistatakse Rooma numbriga I neutraalset aatomit ja II ühekordselt ioniseeritud aatomit.

Tähe HR 8752 spektris esinevad kokkupõrkeliselt ergastatud [N II] jooned lainepikkustel 6548 ja 6583 Å, mis viitavad tähte ümbritsevale H II gaasipilvele temperatuuriga suurusjärgus 10000 K. Vastavate joonte avastamise ajal oli HR 8752 G–F tüüpi ja selliste jahedamate tähtede puhul on keelatud joonte spektris esinemine ebaharilik. [N II] kiirgusjooni on täheldatud veel ühe kollase hüperhiiu HR 5171 spektris (Sheffer ja Lambert, 1992).

Selgus, et HR 8752-l on kuum B-tüüpi (B1 V) kaaslastäht (Stickland ja Harmer, 1978). Arvatakse, et B-tähe ultravioletervoog ioniseerib gaasipilve ja tekitab seeläbi lämmastiku kiirgusjooned (Higgs et al., 1978).

Kõnealuse H II ja [N II] piirkonna ruumala on palju väiksem tavalistest varajasi B-tüüpi tähti ümbritsevatest H II sfääridest tähetekkepiirkondades. Järelikult on HR 8752 ümbritsev kiht lühikese dünaamilise vanuse ja ebahariliku keemilise koostisega, mistõttu pakub emissiooni uurimine huvi (Osterbrock, 1989).

Spektris esinevad ka metallide kiirgusjooned, mille põhjal on kollase hüperhiiu gaasikihi raadiuseks hinnatud mitu tähe raadiust (Lambert ja Luck, 1978).

2.2 Massikaotuse episoodid

HR 8752 on 30 aasta jooksul kaks korda ebastabiilsuse piirkonna ääreni jõudnud, kui ta paiskas intensiivselt ainet välja aastatel 1970 ja 1979–1982. Tähe efektiivne temperatuur on massikaotuse tagajärjel kahanenud ja siis tõusnud ning seejärel sedasama hiljem korranud (de Jager ja Nieuwenhuijzen, 1997). Ajavahemikus 1973–2000 tõusis temperatuur järsult 4000 kelvinilt 8000 kelvinini, mistõttu võib kolmas massikaotus olla lähenemas või juba toimumas (Nieuwenhuijzen et al., 2012).

2.3 [N II] 6583 Å spektrijoone vaadeldavad suurused

Tähte jälgiti ajavahemikus 1976–1991, mille jooksul saadud punase spektripiirkonna vaatlusandmete põhjal mõõdeti [N II] 6583 Å spektrijoone ekvivalentlaiust ja lainepikkuse muutlikkust (Sheffer ja Lambert, 1992). Ekvivalentlaius tähendab tähekontinuumi kõrgusega risküliku laiuse leidmist nii, et selle risküliku pindala on võrdne spektrijoone pindalaga.

Hiljem on käsitletava joone intensiivsust ja profiili kuju uuritud aastate 1993–2011 vaatlusandmete põhjal (Lobel et al., 2013). Järgnevalt tuuakse välja nendes artiklides kajastatud HR 8752 vaadeldavad suurused.

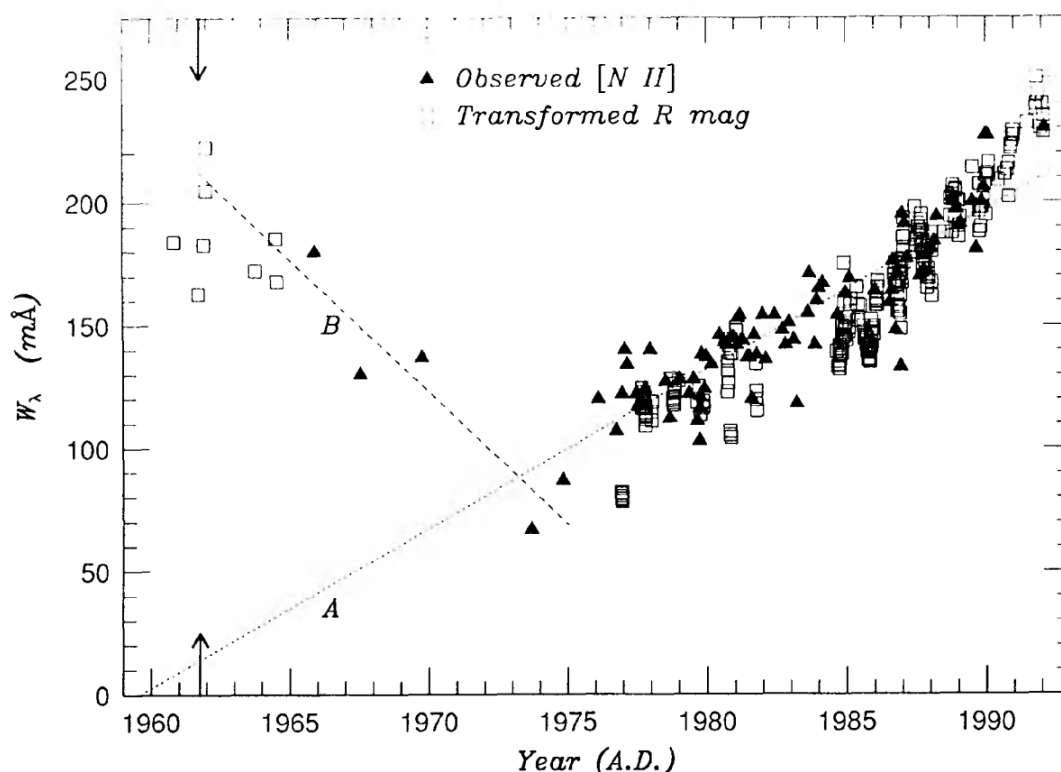
2.3.1 Radiaalkiirus

Emissioonijoone asendit mõõdeti autorite Sheffer ja Lambert artiklis profiili poolel intensiivsusel ja leiti, et sellele vastav spektrijoone radiaalkiirus oli 26. aasta jooksul peaaegu sama. Selle väärtus oli -72 km s^{-1} 1965. aastal ja $-69 \pm 2 \text{ km s}^{-1}$ aastatel 1976–1991. Järelikult [N II] kiirgust andva ruumala kiirus ei muutu meie suhtes.

2.3.2 Ekvivalentlaius ja profiil

Tugev [N II] joon lainepikkusel 6583 Å tuvastati tähe HR 8752 spektris esimest korda 1961. aastal (Sargent, 1965). Sellel vaatlusel ekvivalentlaiust ei mõõdetud, kuid väärtuseks võis Shefferi ja Lamberti hinnangul olla umbes 200 mÅ . Kuus aastat hiljem oli väärtuseks 130 mÅ (Herbig, 1969) ning 1973. aastal 66 mÅ (Luck, 1975), mis tähendab, et 12 aasta jooksul toimus uuritava joone ekvivalentlaiuse kahanemine.

Üllatuslikult oli 1976. aastal joone ekvivalentlaiuse väärtus suurem kui 1973. aastal. Perioodil 1976–1991 kasvas ekvivalentlaius 110 mÅ võrra ehk 1976. aasta väärtuselt $120 \pm 10 \text{ mÅ}$ väärtuseni $230 \pm 10 \text{ mÅ}$ 1992. aastal. Ekvivalentlaiuse kasv oli 16 aasta jooksul peaaegu lineaarne, suurenedes $6,5 \text{ mÅ}$ võrra aastas.



Joonis 2.1: [N II] 6583 Å joone käitumine aastatel 1961-1991. Kolmnurkadega on tähistatud spektrijoone ekvivalentlaiused ja ruutudega nende kaudu tuletatud tähesuurused punast piirkonda eraldavas R-filtris. Allikas: Sheffer ja Lambert (1992)

Lineaarsest trendist esines suuremate ja väiksemate väärtustega andmeid. Hajumise selgitamiseks pakkusid Sheffer ja Lambert (1992) välja nelja erinevat põhjust:

1. Tähe heleduses (seega kontinuumis) on vaadeldud tsüklilist lainetust ajaskaalas 300-400 päeva, mis võib ilmned ka ekvivalentlaiuse väärtuses;
2. Mõõtmistulemuste hajumine tulenevalt kontinuumi määramise subjektiivsusest;
3. Episoodiline mõju lainepikkusel 6580,785 Å asuva Maa atmosfäärijoone poolt;
4. Võimalikud tähe fotosfäärilised jooned, mis langevad [N II] emissiooni lainepikkusega kokku. Kandidaat selleks on neutraalse räni (Si I) spektrijoon, mis asub lainepikkusel 6583,707 Å.

Nagu ka jooniselt 2.1 nähtub, muutub ekvivalentlaiustega sarnaselt tähesuurus punast piirkonda eraldavas R-filtris. Tähesuuruse kasv tähendab astronoomias heleduse kahanemist ning seega uuritava joone ekvivalentlaiuse suurenemisel tähe heledus punases piirkonnas kahaneb ja vastupidi. Tähe heledusega korreleerub omakorda tema värvus, mis heleduse kahanedes muutus sinisemaks ehk efektiivne temperatuur tõusis.

Aastail 1993-2011 toimus [N II] joone tähelepanuväärne muutus, kui kontiinumile taandatud tipu maksimaalne intensiivsus kasvas umbes 40%. Kusjuures tõus esines ka kolmiktipuga $H\alpha$ joones. Sel perioodil muutus [N II] joone kuju lamedatipulisest (1993–1996) teravatipuliseks (2002–2011). On oletatud, et profiili muutused võivad olla tekitatud tähe HR 8752 ja tema kaaslase tähetuulte interaktsiooni poolt (Lobel et al., 2013).

[N II] joone intensiivsuse suurenemine aeglustus aastatel 2005-2011, mis võib viidata sellele, et varsti saavutatakse maksimaalne emissioonijoone intensiivsus (Lobel et al., 2013).

Peatükk 3

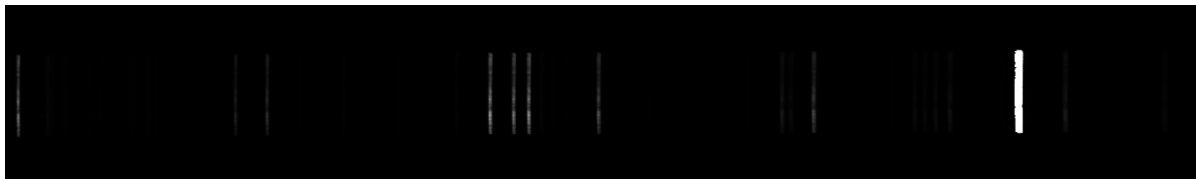
Vaatlused

Käesolevas töös kasutatavad tähe HR 8752 spektroskoopilised vaatlusandmed on kogutud Tartu Observatooriumi 1,5 m teleskoobiga AZT-12 aastatel 2000–2017, millest autor osales kahel vaatlusel aastal 2015. Tähe kiirguse disperseerimiseks kasutati teleskoobi spektrograafis peegeldifraktsioonivõret, millel on 1800 joont millimeetri kohta. Huvipakkuva spektriosa mõõtmiseks seati võrenurgaks $47^{\circ}6'$.

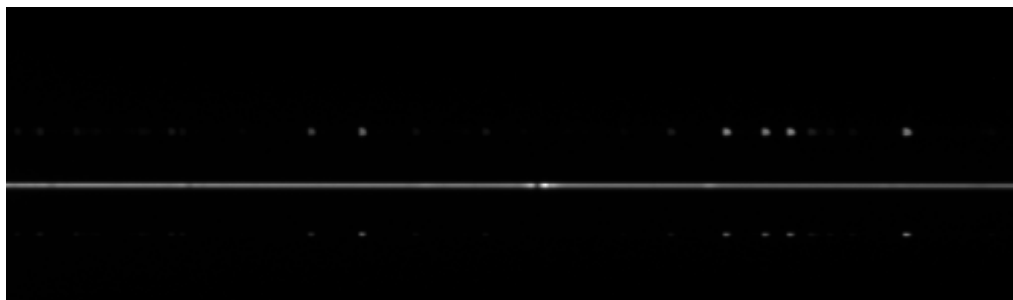
Aastatel 2000–2005 kasutati spektrite salvestamiseks 512×150 pikslist CCD-kaamerat SpectraSource Orbis-16, mille ruudukujulise piksli küljepikkus on $24 \mu\text{m}$. Aastatel 2005–2017 kasutati CCD-kaamerat Andor Newton DU970N sensori suurusega 1600×200 ja piksli suurusega $16 \mu\text{m}$. Selle kaameraga salvestatud tähe spektrist on näide joonisel 3.1. Spektri registreerimise säriajad varieerusid 3...15 minutitini. Lisaks säritati enne ja pärast tähekaadreid Th-Ar (toorium-argooni) spektraallampi, et saadud kaadreid hiljem lainepikkuste kalibreerimiseks kasutada. Hilisemal ajavahemikul salvestati võrdluslambi spekter eraldi kaadrisse, millest on näide joonisel 3.2. Varasemas ajavahemikus oli võimalik võrdluslambi spektreid tähe spektriga samasse kaadrisse salvestada (vt joonis 3.3).



Joonis 3.1: Näide tähe HR 8752 spektrit sisaldavast toorkaadrast, mis on salvestatud kaameraga Andor Newton DU970N.



Joonis 3.2: Näide võrdlusalambi spektrist, mis on salvestatud kaameraga Andor Newton DU970N.



Joonis 3.3: Näide tähe HR 8752 spektrit sisaldavast toorkaadrist koos temast all ja üleval asuvate võrdlusalambi spektritega, mis on salvestatud kaameraga SpectraSource Orbis-16.

Andmetöötlusel lugemismüra (ingl *read-out noise*) poolt lisandunud nivoo eemaldamiseks põhikaadrist tehti suletud katiku ja null-sekundilise säritusega eelpingekaadrid (ingl *bias frame*). Väljalugemismüra on CCD-kaameratele iseloomulik kõikide pikslite väljundväärtustele lisandunud keskmine signaalitase. See tuleneb analoogsignaali digitaalseks muundamisest ja elektroonika poolt tekitatud juhuslikest soovimatutest muutustest väljundsignaalis (Howell, 2006).

Lisaks on igal CCD pikslil on oma naaberpikslist veidi erinev kvantefektiivsuse väärtus, mis väljendab suhet detektori peale langevate ja seadme poolt salvestatavate footonite vahel. Nende väärtuste ühtlustamiseks kasutatakse tasaväljakaadreid (ingl *flat frame*), millega hiljem põhikaader läbi jagatakse (Howell, 2006). Selleks jäädvustati spektrograafis paikneva hõõglambi pidevspekter.

Nii eelpinge- kui ka tasaväljakaadrid lisandusid igale vaatlusele alates 2014. aastast.

Peatükk 4

Andmetöötlus

Selleks, et spektreid oleks võimalik analüüsida, tuli toorkaadrid eelnevalt töödelda. Andmetöötlust viidi läbi operatsioonisüsteemis Linux tarkvaraga IRAF¹ (Image Reduction and Analysis Facility). Vaatlustel registreeritud spektrid salvestati astronoomias laialt kasutatavas FITS (Flexible Image Transport System) failiformaadis, mis võimaldab lisada informatsiooni vaatluse kohta nagu asukoha koordinaadid, säriaeg, kuupäev maailmaaja järgi, Juliuse päev (kuupäevade arv alates 1. jaanuarist aastal 4713 e.m.a.) ja võrenurk. 2014. aasta ja sellest uuemate andmete päistesse olid vastavad parameetrid vaatleja poolt lisatud.

4.1 Aastate 2014–2017 andmed

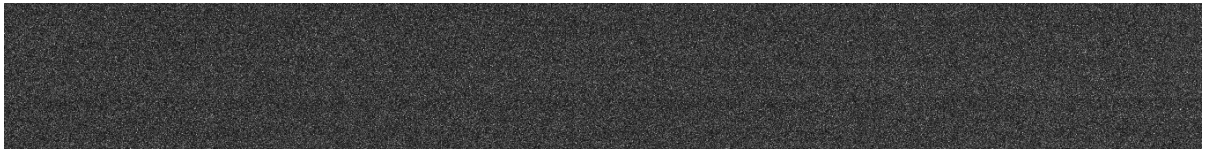
Aastatest 2014–2017 on tähe HR 8752 spektreid 13. vaatlusööst.

Nende andmete puhul eemaldati failidelt kõigepealt vajadusel kosmiliste kiirte ehk tähdevahelisest ruumist Maale jõudvate laetud osakeste tekitatud mürasignaalid. Seda võimaldas automaatselt sooritada programm *Detect and Remove Cosmic Rays*² (DCR).

Üksikute eelpingekaadrite lugemismüra varieeruvuste vähendamiseks töötatakse üldiselt vähemalt kümnest individuaalsest kaadrist mediaankeskmistatud kaadriga. Seda tehti andmetöötluses käsuga *imcombine* ning käsu *imarith* abil lahutati keskmistatud eelpingekaader (vt joonis 4.1) spektrikaadritest.

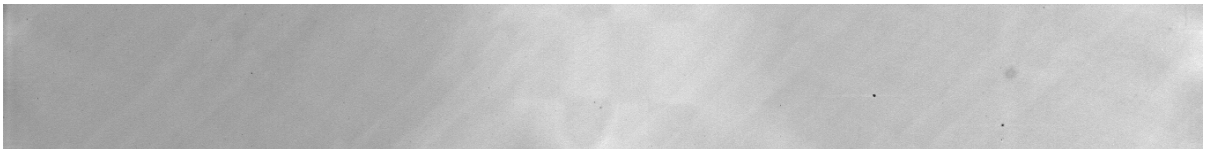
¹<http://iraf.net>

²<http://users.camk.edu.pl/pych/DCR/>



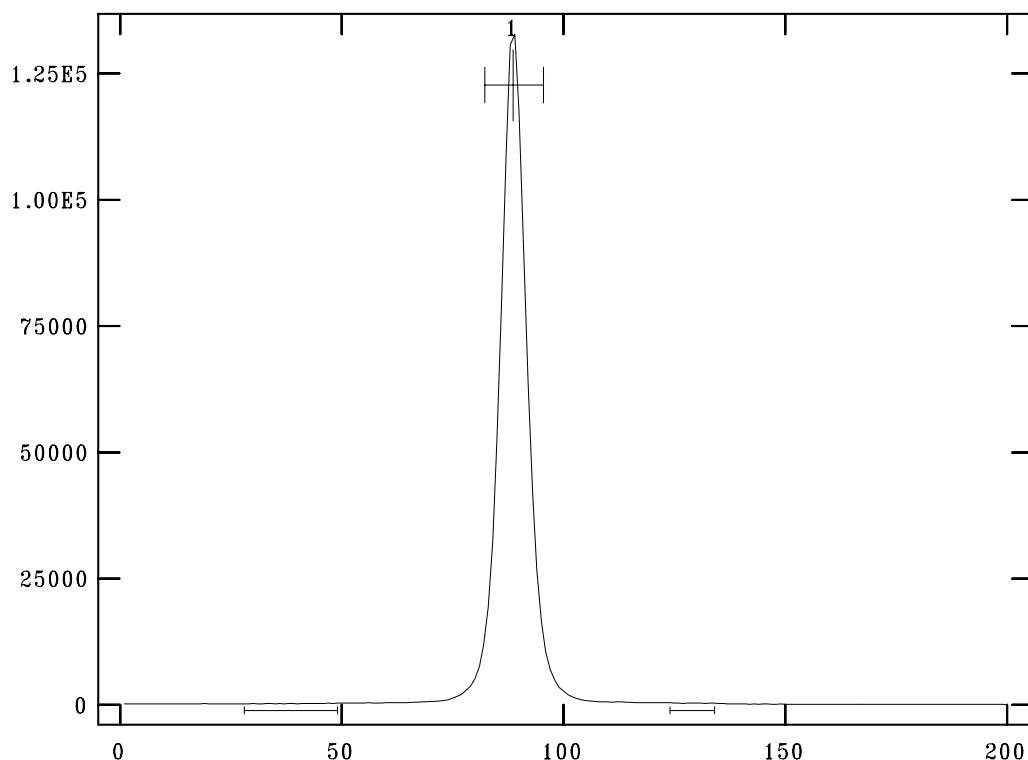
Joonis 4.1: Näide eelpingekaadrist.

Sarnaselt toimiti ka tasaväljakaadri korrektsiooni puhul. Kõigepealt loodi keskmistatud tasaväljakaader ning seejärel käskude *blkavg*, *median* ja *blkrep* abil mediaantasaväljakaader. Käsuga *blkavg* keskmistati tähe signaalile vastavad piksliread ning *blkrep*'i abil tekitati üherealisest (üle tähe signaalile vastavate ridade keskmistatud) pildist uuesti algsele kaadrisuurusele vastav tasaväljakaader. Käsuga *illum* korrigeeriti tasaväljakaadris risti dispersiooniga olevat valgustatuse ebaühtlust. Viimasena saadud kaadriga (vt joonis 4.2) jagati tähe signaali sisaldav andmekaaader läbi.



Joonis 4.2: Näide tasaväljakaadrist.

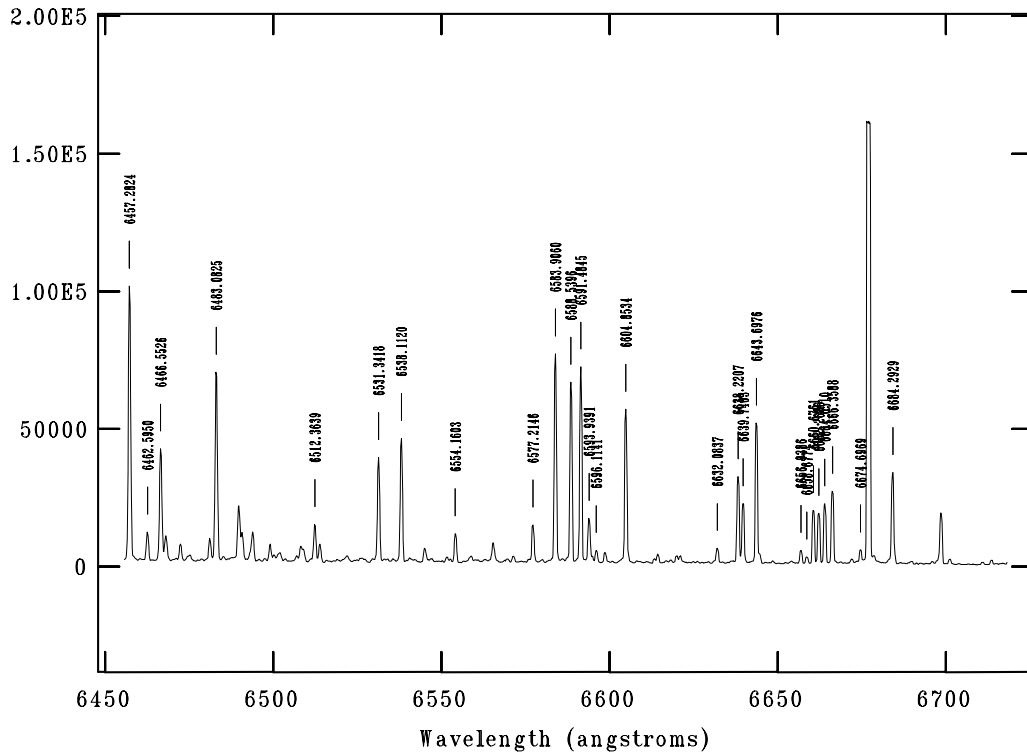
Pärast neid eeltötluse samme on võimalik kaadrist eraldada tähe spekter, milleks kasutatakse IRAFi töötluspaketi *twodspec/apextract* käsku *apall*. Selle abil määratakse tähe signaali apertuuri laius tähe signaali sisaldavate ridade summeerimiseks ning seejärel taevafooni apertuuride laiused, mis on mõlemal pool tähe signaali (vt joonis 4.3). Apertuuri asukohta ridade peal sõltuvalt veerunumbrist piki spektrit kirjeldab polünoom, mille järku on võimalik muuta. Vastavat protsessi viidi iga tähe spektrit sisaldava toorkaadri jaoks eraldi läbi, mille tulemusena saadi ühemõõtmelised taevafoonita tähespektrid.



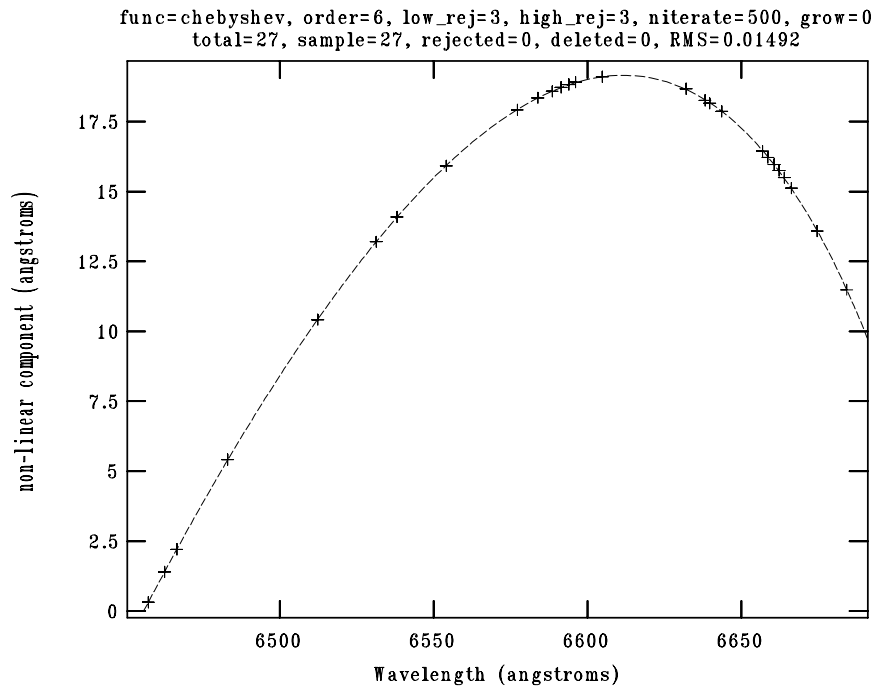
Joonis 4.3: Kasutajaliides apertuuride määramiseks. Horisontaalteljel on kaadri ridade numbrid ja vertikaalteljel on signaali tugevus. Keskkel on tähe signaal, mida ümbritseb taevafoon.

Järgmised sammud on vajalikud üleminekuks pikslitelt lainepikkustele. Esmalt eraldati võrdlusspektrid käsku *apall* kasutades, kuid ilma apertuuriga seotud valikuteta.

Pärast võrdlusspektrite eraldamist on vajalik tuvastada neil registreeritud spektrijoonte lainepikkused. Tuvastamist tehti paketi *onedspec* käsuga *identify*. Graafilises kasutajaliideses, mis on esitatud joonisel 4.4, lisati teatud arvule spektrijoontele lainepikkuste väärtused käsitsi. IRAF sobitas nendele esmalt määratud lainepikkustele dispersioonikõvera ehk lainepikkuse kui piksli koordinaatide funktsiooni ja seejärel oli võimalik ülejäänud väärtused lihtsamalt identifitseerida. Dispersioonifunktsiooni (vt joonis 4.5) kvaliteeti hinnati võrdlusspektri joonte andmebaasist pärinevate lainepikkuste ja leitud dispersioonikõveraga määratud võrdlusspektri joonte lainepikkuste vahede ruutkeskmise väärtuse põhjal (esitatud joonisel 4.5 RMS väärtusena). Käskudega *refspec* ja *dispcor* lisati tähe spektritele võrdlusspektrite abil lainepikkused juurde, mille käigus lainepikkuste skaala lineariseeriti.



Joonis 4.4: Kasutajaliides spektrijoonte lainepikkuste määramiseks ja tuvastamiseks.



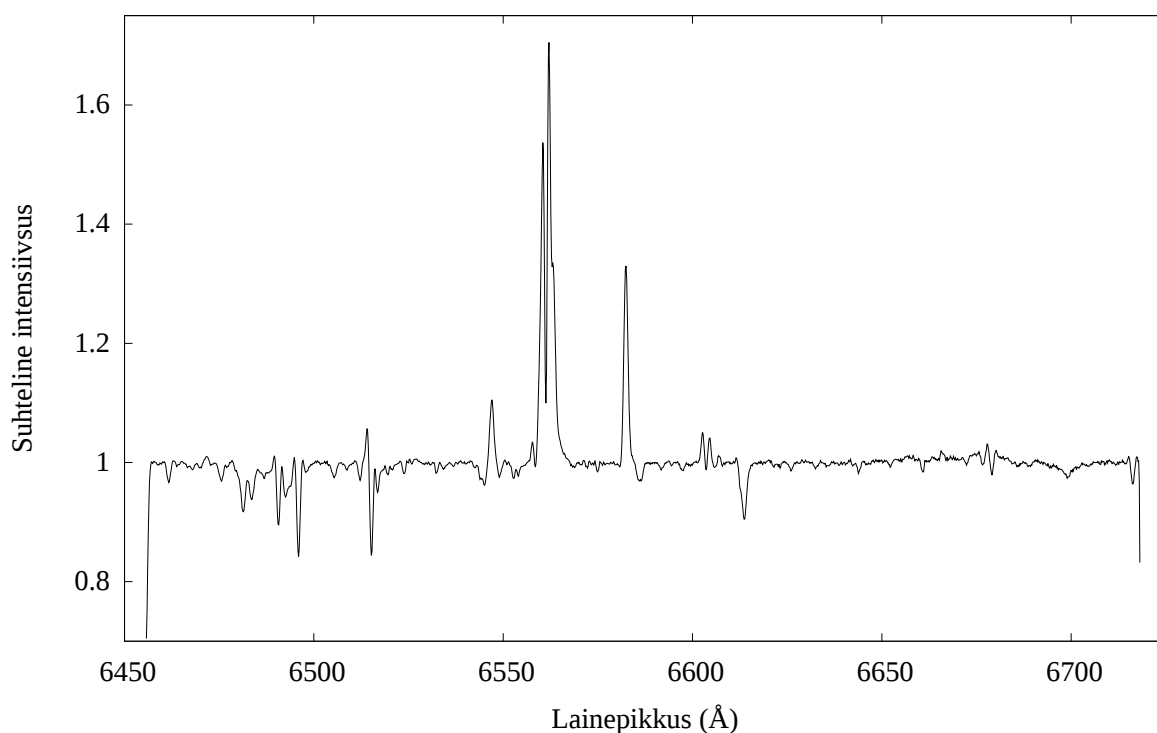
Joonis 4.5: Võrdlusspektri joonte andmepunkte läbiv dispersioonifunktsioon. Tegu on 27 võrdlusspektri joone põhjal määratud 6. järku Tšebõšovi funktsiooniga. Saadud lainepikkuste skaala määramatus (RMS) on 15 mÅ.

Kui ühest vaatlusööst oli rohkem kui üks tähe spekter, siis need liideti üksteisega käsu *scombine* abil kõrgema signaal-müra suhte jaoks.

Viimasena normaliseeriti lainepikkustega kalibreeritud tähe spekter kontinumile. Selleks kasutati programmi *specnorm*³, mida kasutusmugavuse tõstmiseks täiendas Tartu Observatooriumis Tõnis Eenmäe. Selle programmi abil märgiti punktid spektri pidevkohtades, kus puudusid Maa atmosfääris tekkivad veeauru neeldumisjooned ja tähe spektrijooned.

Kõikidel töödeldud spektritel mõõdeti ekvivalentlaidus IRAFis. Käsk *splot* võimaldas spektrijoonel märkida käsuga *e* käsitsi algus ja lõpp-punkt, mida tehti suhtelise intensiivsuse väärtuse 1 juures.

Näide andmetöötluse lõpptulemusest on esitatud joonisel 4.6.



Joonis 4.6: Näide tähe HR 8752 töödeldud spektrist.

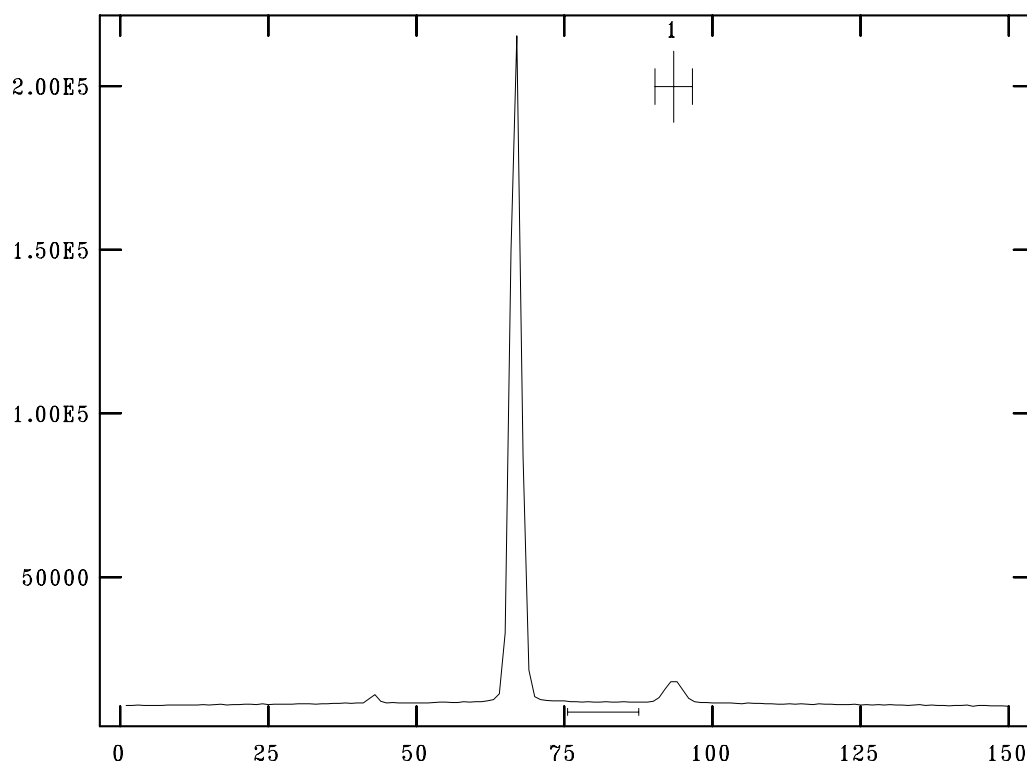
4.2 Aastate 2000–2013 andmed

Aastatest 2000–2013 on tähe HR 8752 spektreid 36. vaatlusööst.

Andmetöötlust viidi eelmises paragrahvis kirjeldatuga enamjaolt samamoodi läbi, kuid

³<http://python4esac.github.io/plotting/specnorm.html>

mõned sammud erinesid andmete kogumise meetodi, spektrograafi võrdlusspektri tekitamise optiliste muudatuste ja kaamera juhtimise tarkvara erinevuste tõttu. Esiteks, alustati FITS failide päistesse parameetrite lisamisega. Vaatluse kuupäev, sellele vastav maailmaaeg ja keskmine maailmaaeg lisati käsitsi arvestades, millistel kuupäevadel vastavatel aastatel suve- ja talveajale üle mindi. Tasavälja- ja eelpingekaadrite puudumise tõttu mindi järgmisena tähe- ja võrdlusspektrite eraldamise juurde. Kuna võrdluslambi spektrid olid enamasti tähe spektriga samas kaadris, siis avati sama faili kahe võrdlusspektri puhul käsuga *apall* kolm korda ning iga spektri eraldamise järel salvestati väljund uude faili. Joonisel 4.7 on näide apertuuri määramisest ühele võrdlusspektritest.



Joonis 4.7: Kasutajaliides apertuuride määramiseks. Horisontaalteljel on kaadri ridade numbrid ja vertikaalteljel on signaali tugevus. Kaadri keskel on kõrge tähesignaali, seda mõlemalt poolt ümbritsev taevafoon ning väiksemate tippudena võrdlusspektrite signaalid.

Peatükk 5

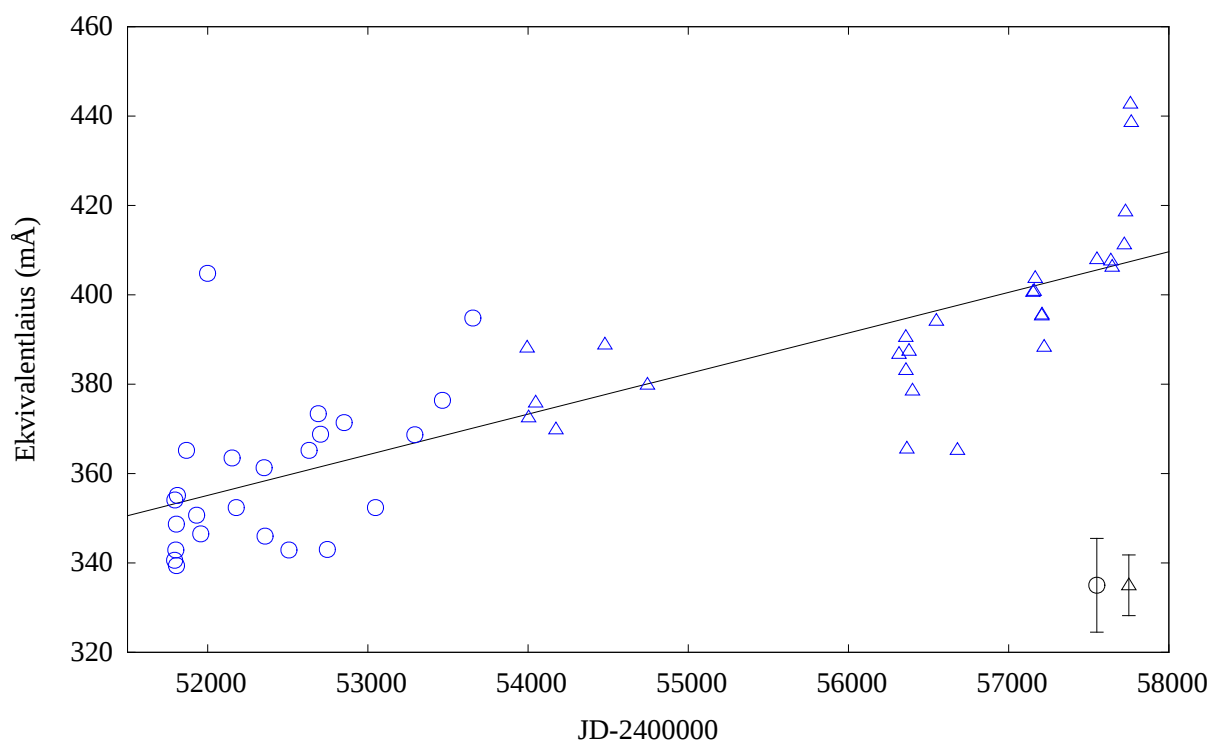
Tulemused

5.1 [N II] 6583 Å spektrijoone ekvivalentlaiused 2000–2017

Tabelis 5.1 ja joonisel 5.1 esitatakse töödeldud vaatlusandmetest mõõdetud uuritava joone ekvivalentlaiused 51 spektri jaoks.

Tabel 5.1: Spektrite salvestamise kuupäevad ja neile vastavad ekvivalentlaiuste (tähistatud "EW") väärtused.

Kuupäev	EW [mÅ]	Kuupäev	EW [mÅ]	Kuupäev	EW [mÅ]
05.09.2000	352,4	05.03.2003	368,8	26.03.2013	387,5
07.09.2000	340,6	18.04.2003	343,0	16.04.2013	378,6
13.09.2000	354,1	31.07.2003	371,4	12.09.2013	394,2
16.09.2000	342,9	11.02.2004	352,4	22.01.2014	365,3
17.09.2000	348,7	14.10.2004	368,7	08.05.2015	400,7
23.09.2000	339,4	04.04.2005	376,4	16.05.2015	400,9
19.11.2000	355,1	11.10.2005	394,8	22.05.2015	403,8
21.01.2001	365,2	15.09.2006	388,2	11.06.2015	395,4
16.02.2001	350,7	24.09.2006	372,6	02.07.2015	395,6
30.03.2001	346,5	07.11.2006	375,9	04.07.2015	388,4
30.08.2001	404,8	14.03.2007	369,9	17.07.2015	408,0
25.09.2001	363,5	06.10.2008	388,9	05.09.2015	407,7
19.03.2002	361,3	14.01.2008	379,9	14.09.2016	406,3
25.03.2002	346,0	22.01.2013	386,8	29.11.2016	411,3
21.08.2002	342,9	06.03.2013	390,6	06.12.2016	418,7
24.12.2002	365,2	07.03.2013	383,2	06.01.2017	442,8
19.02.2003	373,4	12.03.2013	365,6	11.01.2017	438,7



Joonis 5.1: Ekvivalentlaidude väärtused aastatel 2000–2017. Ringid tähistavad väiksema resolutsiooniga ja kolmnurgad suurema resolutsiooniga kaameraga salvestatud spektrite andmeid. Graafiku paremas alumises nurgas on näidatud vastavate andmete mõõtemääramatused.

Töödeldud andmete kohaselt jätkub viimase 17 aasta jooksul 1976. aastal alanud kasvutrend ehk emissioonijoonde ekvivalentlaidude suurenemine. Toetudes paragrahvis 2.3.2 esitatud parameetrite omavahelistele seostele jätkub seega heleduse vähenemine ja tähe sinisemaks muutumine ehk tema efektiivse temperatuuri suurenemine, kuid aeglasemalt kui varem. Temperatuuri kasvuga kaasneb suure tõenäosusega kollase hüperhiiu mõõtmete kahanemine (de Jager, 1998). Sellekohaselt toimub tähe HR 8752 efektiivse fotosfääri kokkutõmbumine.

Tulemustest nähtub, et vähimruutude meetodil leitud regressioonisirge väärtusest esineb sarnaselt varasema epohhi andmetega nii väiksemaid kui ka suuremaid väärtuseid. Leitud mõõtemääramatusi arvestades ei saa see põhjustatud olla andmetötlusest tulenevast määramatusest.

5.1.1 Ekvivalentlaidude mõõtemääramatuste hindamine

Tulemuste mõõtemääramatusi hinnati eraldi SpectraSource Orbis-16 ehk vanema ja Andor Newton DU970Ni ehk uuema kaameraga salvestatud spektrite jaoks. Vanema kaamera andmete

puhul oli signaal-müra suhe halvem, samuti oli spektrit lühem lõik ja lainepikkuste skaala määramine oli väiksema arvu võrdlusspektrijoonte tõttu ebatäpsem. Lisaks ei olnud võimalik sensori tundlikkuse kalibreerimine ja puudusid tasavälja- ning eelpingeaadrid.

Mõõtemääramatuse leidmiseks kuvati kõik vastavate aastate normaliseeritud spektrid samal joonisel, mis tõi välja nende erinevused (vt joonised 5.2 ja 5.3). Kontiinumi taandamisest tuleneva ekvivalentlaiuse mõõtemääramatuse hindamiseks valiti uuritava joone lähedal Maa atmosfääris tekkivatest veeauru neeldumisjoontest ja tähe spektrijoontest vaba kontiinumi lõik. Kõikide vastavate spektrite jaoks salvestati IRAFis seda lõiku sisaldav fail. Käsu *imstat* abil kuvati nende failide keskmised kontiinumi nivood.

Vanema kaamera puhul saadi kontiinumi nivoo standardhälbeks 0,004. Edasise samme mõõtemääramatuse leidmiseks lainepikkustes uuritava joone laiuse kaudu kirjeldavad valemid:

$$\text{joone laius pikslites} = \frac{\text{joone laius ongstromites}}{\text{dispersioon}} \quad (5.1)$$

ehk

$$11,765 \text{ px} \approx \frac{3 \text{ \AA}}{0,255 \frac{\text{\AA}}{\text{px}}}, \quad (5.2)$$

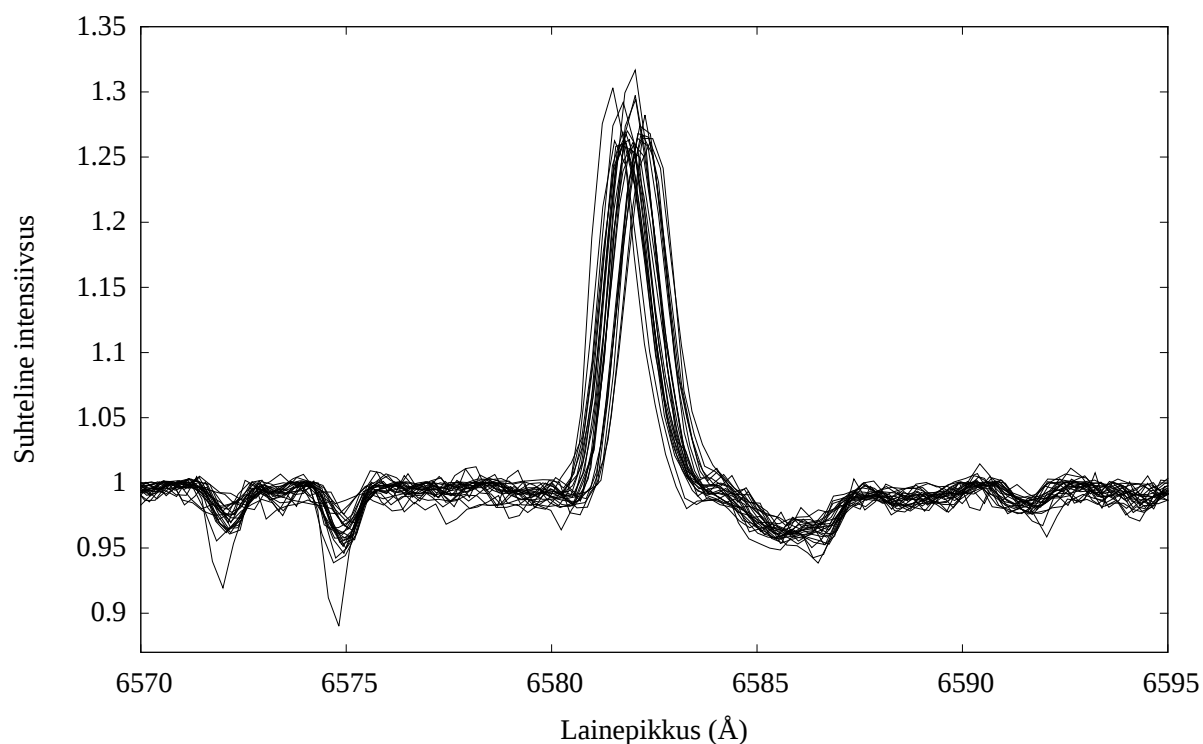
kus dispersioon tähendab lainepikkuse muutust piksli kohta.

Uuritava joone ekvivalentlaiuse mõõtemääramatus saadi järgmiselt:

$$\text{ekvivalentlaiuse määramatus} = \text{joone laius pikslites} \times \text{standardhälve} \times \text{dispersioon} \quad (5.3)$$

ehk

$$12 \text{ m\AA} \approx 11,765 \text{ px} \times 0.004 \times 0,255 \frac{\text{\AA}}{\text{px}}. \quad (5.4)$$

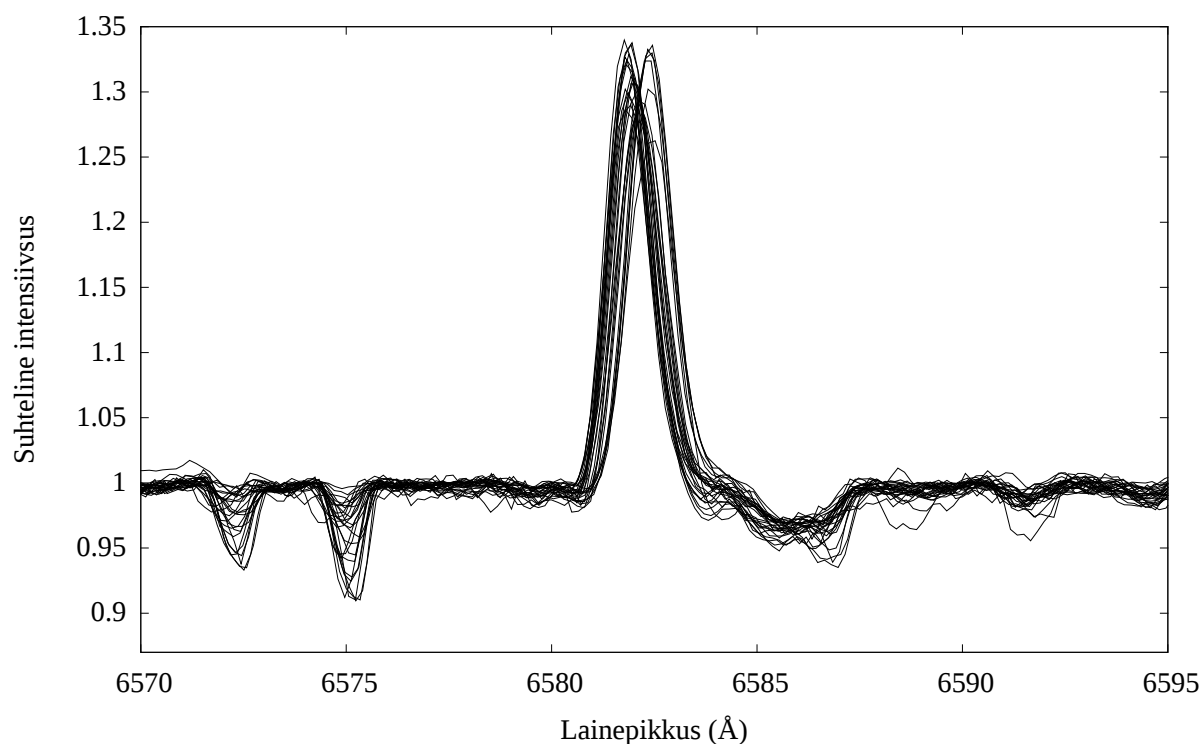


Joonis 5.2: Üksteise peale asetatud töödeldud spektrid, mille toorkaadrid olid salvestatud vanema kaameraga. Kontiinumi määramise standardhälbe hindamiseks valiti lõik 6576...6579 Å.

Uuema kaamera puhul oli kontiinumi standardhälve 0,002. Uuritava joone ekvivalentlaiuse mõõtemääramatus saadi valemitega 5.1 ja 5.3:

$$18,293 \text{ px} \approx \frac{3 \text{ Å}}{0,164 \frac{\text{Å}}{\text{px}}}, \quad (5.5)$$

$$6 \text{ mÅ} \approx 18,293 \text{ px} \times 0,002 \times 0,164 \frac{\text{Å}}{\text{px}}. \quad (5.6)$$



Joonis 5.3: Üksteise peale asetatud töödeldud spektrid, mille toorkaadrid olid salvestatud uuema kaamera. Kontinuumi määramise standardhälbe hindamiseks valiti lõik 6576...6578,5 Å.

Uuritava joone ekvivalentlaiuse mõõtemääramatus vanema kaamera andmete jaoks on seega 12 mÅ ja uuema kaamera andmete jaoks 6 mÅ.

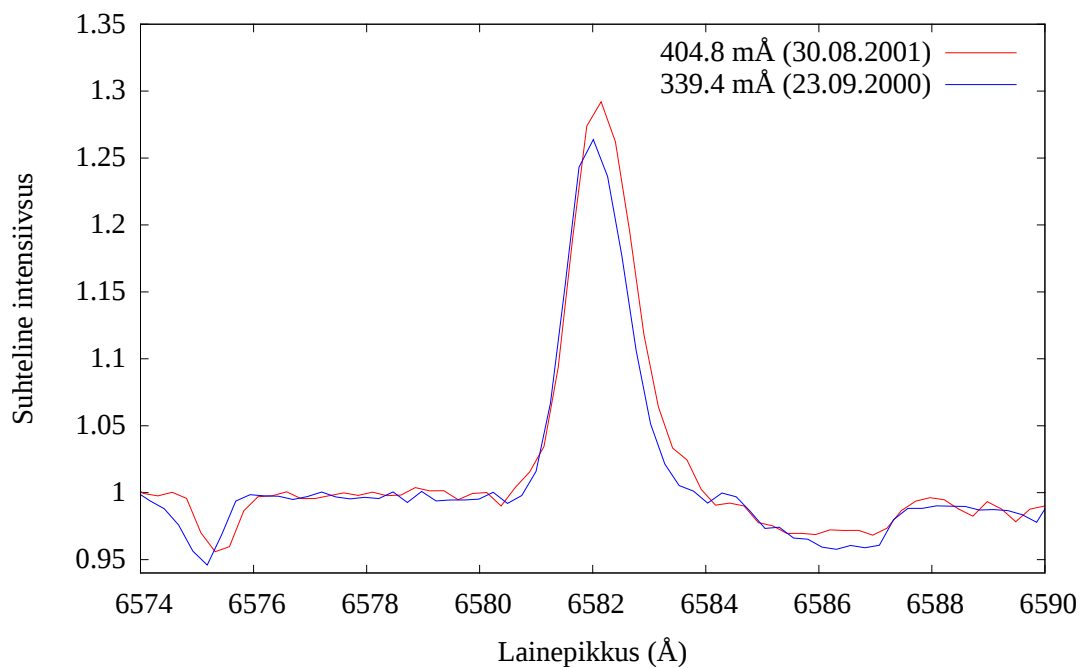
5.1.2 Tulemuste hajumine

Mitmetes töodes, näiteks Nieuwenhuijzen et al. (2012) on esile toodud, et kiirgusjooned võivad seguneda sarnastel lainepikkustel asuvate tähe fotosfääriliste joontega. Nende koosmõju võib põhjustada ekvivalentlaiuste ja spektrijoone asukohtade lühiajalisi muutusi. Pakume, et siinkohal on see mõõtmiste hajumise kõige tõenäolisemaks põhjuseks ja moonutuse tekitajaks on rühi joon. Viimast toodi välja ka 1992. aasta artikli andmete hajumise ühe võimaliku põhjustajana.

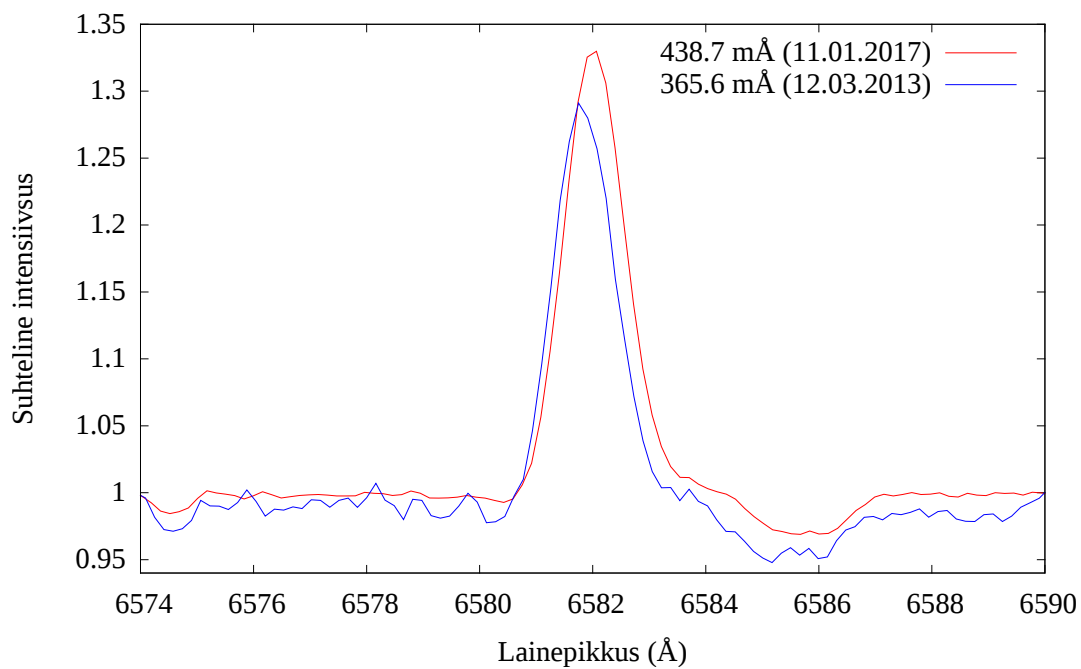
Väikseimate ja suurimate ekvivalentlaiuse väärtustega spektrijoontele tehti heliotsentriline korrektsioon ehk eemaldati tähe spektritele Maa orbitaalliikumise tõttu lisandunud lainepikkuste nihked. Selle läbiviimiseks kasutati IRAFis käsku *rvcorrect*, mis leidis vastava parandi ja käsku *dopcor*, mis rakendas parandi spektrile.

Pannes minimaalsete ja maksimaalsete väärtustega heliotsentriliselt korrigeeritud spektrijooned kohakuti, näeme joonistel 5.4 ja 5.5, et nende erinevused ei ole sümmeetrilised. Joone profiili

väiksemate lainepikkuste poole jäävad tiivad ühtivad, samal ajal kui suuremate lainepikkuste pooled mitte. Kui tegu oleks kontinuumi paigutamisest tuleneva määramatusega, oleks erinevus sümmeetriline.



Joonis 5.4: Näide keskmisest suurema ja väiksema ekvivalentlaiusega spektrijoonest aastatel 2000 ja 2001.

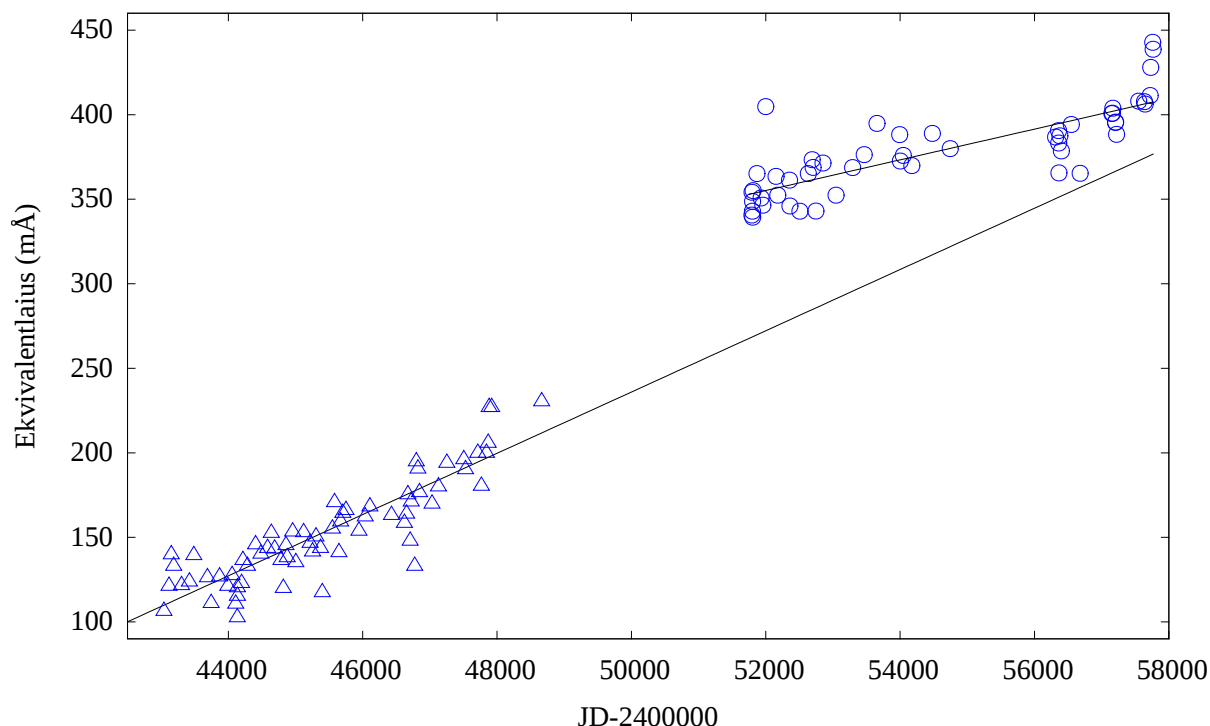


Joonis 5.5: Näide keskmisest suurema ja väiksema ekvivalentlaiusega spektrijoonest aastatel 2013 ja 2017.

5.2 Tulemuste võrdlus varasema epohhiga

Uuritava joone ekvivalentlause kasv on aeglustunud – võrreldes varasema epohhi tõusuga 6,5 mÅ aastas on see hilisemas epohhis 3,3 mÅ aastas.

Kandes aastate 1976-1992 ja 2000-2017 ekvivalentlause tulemused joonisele 5.1, näeme joonisel 5.6, et eelneva epohhi trendi ekstrapoleerimine on ebakorrekne.

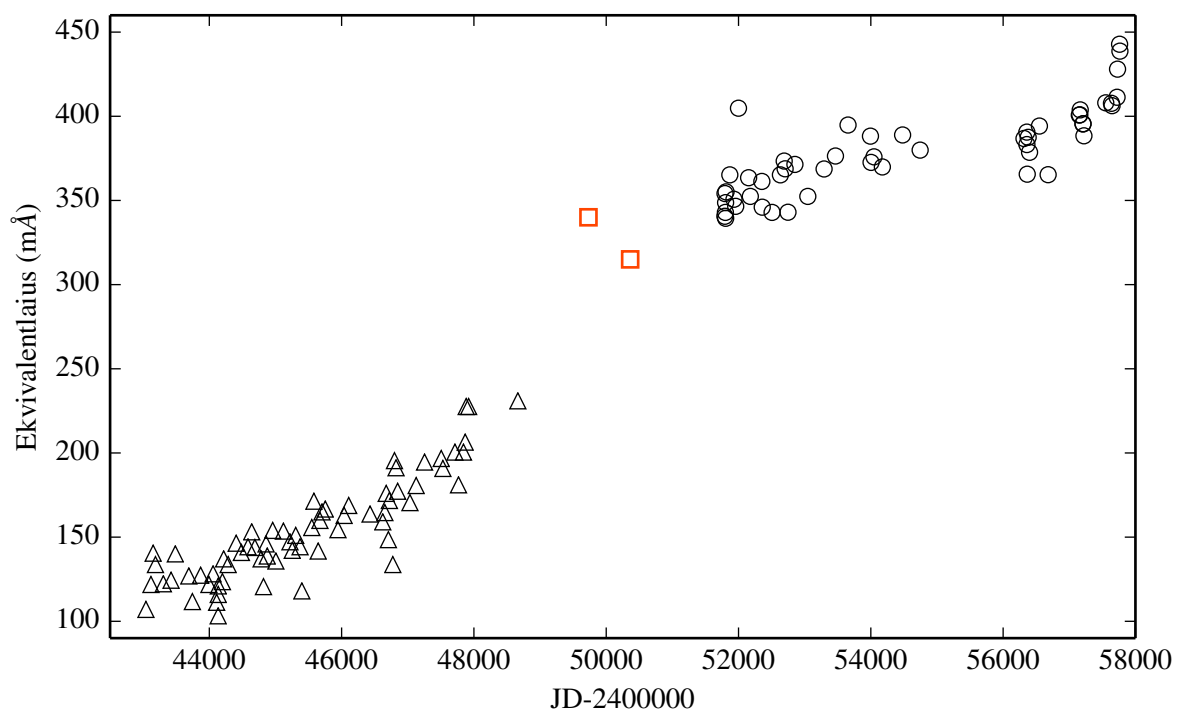


Joonis 5.6: Uuritava joone ekvivalentlauseid vahemikes 1976-1992 ja 2000-2017 koos neile vastavate regressioonisirgetega. Kolmnurgad tähistavad varasema ja ringid hilisema epohhi andmeid.

Vahemikus 1992-2000 tundub olevat toimunud ekvivalentlause tähelepanuväärne muutus, kuid Tartu Observatooriumis ei vaadeldud tähte HR 8752 enne aastat 2000. Seetõttu otsiti lisaandmeid ELODIE¹ avalikust tähespektrite andmebaasist, kus oli olemas kuupäeval 05.10.1996 registreeritud spekter. Selle põhjal oli ekvivalentlause 315 ± 3 mÅ. Artiklist Viotti et al. (1998) saadi ekvivalentlause tulemus aastast 1998 väärtusega 340 mÅ.

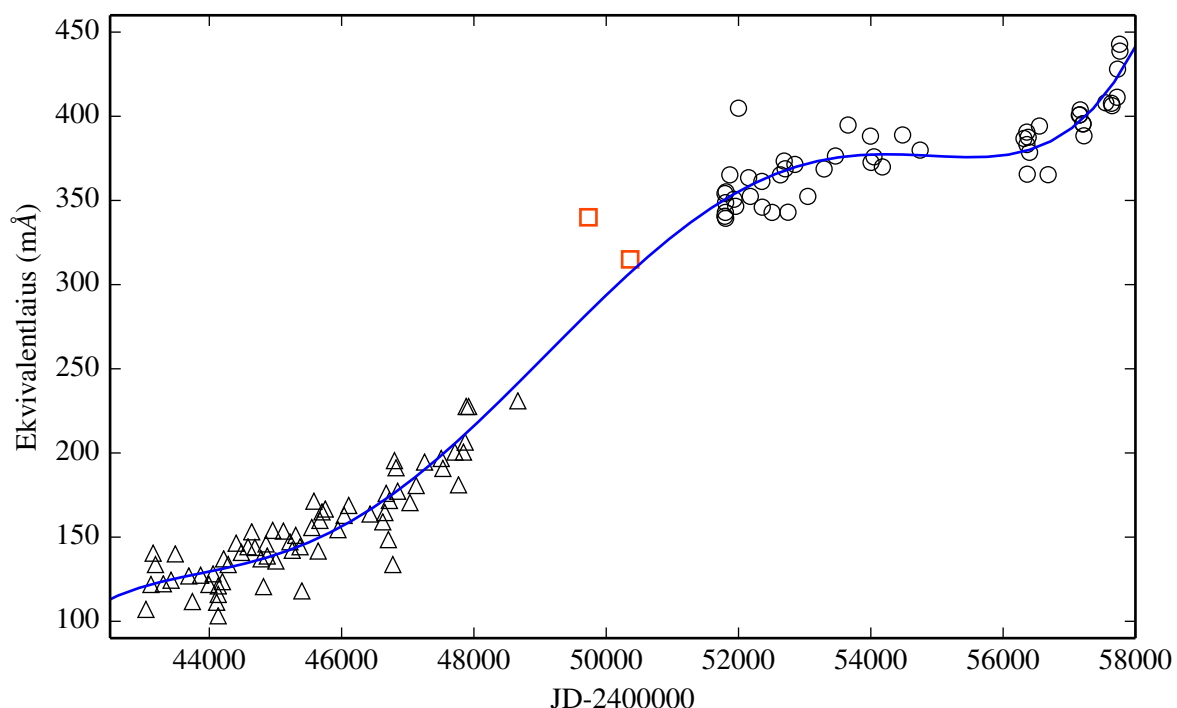
Nende kahe väärtusega täiendati joonist 5.6 ja saadi joonis 5.7.

¹<http://atlas.obs-hp.fr/elodie/>



Joonis 5.7: Ekvivalentlaidused aastatel 1976-1992, 1996, 1998 ja 2000-2017. Kolmnurgad tähistavad vahemiku 1976-1992 andmeid, ruudud vastavalt ELODIE andmebaasist ja Viotti et al. artiklist pärit aastate 1996 ja 1998 andmeid ning ringid käesoleva töö andmeid.

Andmete vahelise seose illustreerimiseks lähendati andmepunktid 5. järku polünoomiga, mida esitab joonis 5.8.



Joonis 5.8: Ekvivalentlaidused aastatel 1976-1992, 1996, 1998 ja 2000-2017 koos lähendpolünoomiga. Kolmnurgad tähistavad vahemiku 1976-1992 andmeid, ruudud vastavalt ELODIE andmebaasist ja Viotti et al. artiklist pärit aastate 1996 ja 1998 andmeid ning ringid käesoleva töö andmeid.

On näha, et varasema ja hilisema epohhi vahel on ekvivalentlaidus kiirenenult kasvanud ning seejärel on kasv aeglustunud. Sellised muutused kajastavad ilmselt tähe väliskihtide reageerimist pikaajalistele evolutsioonilistele muutustele.

Aastatest 1992-2000 on andmepunkte liiga vähe tegemaks järeldust sellest, millal ekvivalentlaiduse kasv aeglustuma hakkas. Muudest allikatest juurde lisatud kaks andmepunkti võivad olla mõjutatud tulemuste hajumisest, mistõttu nad ei ole täielikult usaldusväärsed.

Mõõtetulemuste hajumisega võib olla tegu ka polünoomi tõusu puhul graafiku lõpus, mis seega ei pruugi olla korrektne. Uuritava joone ekvivalentlaiduse edasise käitumise uurimiseks on vajalik tähe HR 8752 vaatlusi jätkata.

Peatükk 6

Kokkuvõte

Käesolevas bakalaureusetöös töödeldi kõik Tartu Observatooriumis kogutud tähe HR 8752 vaatlusandmed kuni jaanuarini 2017. 51 spektrit taandati kontinumile ja neilt mõõdeti [N II] 6583 Å spektrijoone ekvivalentlaid. Hüpotees ekvivalentlaiduse edasisest käitumisest muutus peale 2000–2017 aasta andmete töötlust. Tulemused näitavad, et ekvivalentlaidus küll kasvab, kuid peale 1992. aastat toimus see kiiremini kui enne. Töödeldud andmetele vastavas ajavahemikus 2000–2017 kasv hoopis aeglustus. Eelnevalt kirjeldatud käitumine langeb kokku Lobel et al. (2013) artiklis kirjeldatud emissioonijooone intensiivsuse muutustega. Seega on 41 aasta jooksul tähe HR 8752 heledus punases piirkonnas kahanenud ja efektiivne temperatuur kõrgemaks muutunud, kuid erinevates ajavahemikes erineva kiirusega. Seejuures efektiivse temperatuuri kasv võib viidata tähe mõõtmete vähenemisele.

Tähe edasine jälgimine on vajalik selgitamiseks, kas ta muutub veelgi kuumemaks ja läbib tühiku või muutub tagasi jahedamaks. Selleks jätkatakse tema vaatlemist Tartu Observatooriumis.

Uuritava joone ekvivalentlaiduse mõõtemääramatus leiti erineva kaameraga salvestatud spektrite jaoks ning parema lahutusvõimega kaamera puhul saadi ootustepäraselt väiksem mõõtemääramatus.

Uuritava spektrijoone ekvivalentlaiduse muutumise trendist kaldus mitmeid tulemusi kõrvale. Mõõtemääramatus oli võrreldes hajumisega väike ning minimaalsete ja maksimaalsete väärtustega uuritavad spektrijooned erinesid üksteisest ebasümmeetriliselt. Arvestades neid asjaolusid, nõustuti artiklis Sheffer ja Lambert (1992) pakutud füüsikalise seletusega uuritava joone segunemisest samal lainepikkusel asuva tähe fotosfäärilise spektrijoonega.

Tänuavaldused

Soovin tänada oma juhendajaid, eriti Indrek Kolkat, kes andis mulle võimaluse uurida väga põnevat teemat ja seejuures jagas palju teadmisi tähefüüsika kohta. Olen väga tänulik Anna Aretile, kes õpetas mulle Linuxi ja IRAFi kasutamist ning andmete töötlemist, mis võimaldaski mul antud uurimisteemaga tegelema hakata. Peale selle õpetas ta mind ka Tartu Observatooriumi 1,5 m teleskoobiga vaatlema. Samuti tänan Tõnis Eenmäed, kelle õpetussõnad tegid võimalikuks vanema kaamera andmete töötlemise ja kes oli alati abiks ning andis väärtuslikku nõu paljudes küsimustes. Nii Indrek, Anna kui ka Tõnis viisid läbi vajalikke vaatlusi ning siinkohal ütlen tänusõnad andmete kogumise eest ka Alar Pussile, Laurits Leedjärvele ja Anti Hirvele.

Tänan siiralt Tartu Observatooriumi sõbralikku ja abivalmit kollektiivi suurepäraste võimaluste eest juba keskkooli lõpetamisest saati.

Mari-Liis Aru

Kirjandus

- Basu, B. (2003). *An Introduction to Astrophysics*. Prentice Hall India.
- Benaglia, P., Vink, J.Š., Martí, J., Apellániz, J. M., Koribalski, B., ja Crowther, P. A. (2007). Testing the predicted mass-loss bi-stability jump at radio wavelengths. *Astronomy & Astrophysics*, 467(3):1265–1274.
- de Jager, C. (1998). The yellow hypergiants. *Astronomy & Astrophysics Review*, 8(3):145–180.
- de Jager, C. ja Nieuwenhuijzen, H. (1997). An obstacle to the late evolution of massive stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 290(3):L50–L54.
- Emerson, D. (1999). *Interpreting Astronomical Spectra*. John Wiley and Sons.
- ESO (2007). *Hertzsprung-Russell Diagram*. <https://www.eso.org/public/images/eso0728c/>. Kasutatud: 17.05.2017.
- Feast, M. W. ja Thackeray, A. D. (1956). Red supergiants in the Large Magellanic Cloud. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 116.
- Goldsmith, D. ja Owen, T. (2001). *The search for life in the universe*. University Science Books.
- Herbig, G. H. (1969). Forbidden emission transitions in cool stars. *Memoires of the Societe Royale des Sciences de Liege*, 25:353–361.
- Higgs, L. A., Feldman, P. A., ja Smolinski, J. (1978). The radio source associated with the G-type supergiant HR 8752. *Astrophysical Journal*, 220:L109–L112.
- Howell, S. B. (2006). *Handbook of CCD Astronomy*. Cambridge University Press.
- Keenan, P. C. (1971). Classification of supergiants of types G, K, and M. *Contributions from the Kitt Peak National Observatory*, 554:35–39.
- Lambert, D. L. ja Luck, R. E. (1978). Spectrum variations of the superluminous star HR 8752. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 184:405–422.

- Lobel, A., de Jager, K., ja Nieuwenhuijzen, H. (2013). Long-term Spectroscopic Monitoring of Cool Hypergiants HR 8752, IRC+10420, and 6 Cas near the Yellow Evolutionary Void. In Pugliese, G., de Koter, A., ja Wijburg, M., editors, *370 Years of Astronomy in Utrecht*, volume 470 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 167.
- Luck, R. E. (1975). An analysis of the superluminous star HR 8752. *Astrophysical Journal*, 202:743–754.
- Meynet, G., Georgy, C., Hirschi, R., Maeder, A., Massey, P., Przybilla, N., ja Nieva, M.-F. (2011). Red Supergiants, Luminous Blue Variables and Wolf-Rayet stars: the single massive star perspective. *Bulletin de la Societe Royale des Sciences de Liege*, 80:266–278.
- Meynet, G., Maeder, A., Schaller, G., Schaerer, D., ja Charbonnel, C. (1994). Grids of massive stars with high mass loss rates. V. From 12 to 120 M_{sun} at $Z=0.001, 0.004, 0.008, 0.020$ and 0.040 . *Astronomy & Astrophysics Suppl.*, 103.
- Nieuwenhuijzen, H. ja de Jager, C. (2000). Checking the yellow evolutionary void. Three evolutionary critical Hypergiants: HD 33579, HR 8752 & IRC +10420. *Astronomy & Astrophysics*, 353:163–176.
- Nieuwenhuijzen, H., Jager, C. D., Kolka, I., ja Israelian, G. (2012). The hypergiant hr 8752 evolving through the yellow evolutionary void. *Astronomy & Astrophysics*, 42:1337.
- Osterbrock, D. E. (1989). *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei*.
- Sargent, W. L. W. (1965). A Possible Relationship Between the Peculiar a Stars and the λ BOÖTIS Stars. *Astrophysical Journal*, 142:787–790.
- Schmid-Burgk, J. ja Scholz, M. (1975). Extended static stellar atmospheres. II - location in the hr-diagram and some properties of extended atmosphere stars. *Astronomy & Astrophysics*.
- Sheffer, Y. ja Lambert, D. L. (1992). Behavioral study of yellow supergiants. III - forbidden N II emission of HR 8752 from 1961-1991. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 104:1054.
- Stickland, D. J. ja Harmer, D. L. (1978). The discovery of a hot companion to HR 8752. *Astronomy & Astrophysics*, 70:L53–L56.
- Stothers, R. B. ja wen Chin, C. (2001). Yellow hypergiants as dynamically unstable post–red supergiant stars. *The Astrophysical Journal*, 560(2):934–936.
- Viotti, R., Rossi, C., ja Muratorio, G. (1998). Optical and near-IR observations of variable stars with AURELIE. *Astronomy & Astrophysics Supplement*, 128:447–455.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Mari-Liis Aru,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Kollase hüperhiu HR 8752 emissioonijoone

[N II] 6583 Å muutlikkuse uurimine,

mille juhendajad on Indrek Kolka, PhD ja Andreas Valdmann, MSc,

- (a) reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - (b) üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
 3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartu, 25. mai 2017. a.